

УДК 621.313.2-047.37

Р. В. Краснов

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПУСКУ ТА РОБОТИ В НЕНОМІНАЛЬНИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ КОМПРЕСОРІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В статті розглянуто можливі режими роботи електродвигуна компресора електропоїзда постійного струму, при яких відбувається нагрівання ізоляції обмоток якоря зверх встановлених значень. При цьому теплове реле ТРВ-8,5 не виконує свої функції і, як наслідок, за один рік експлуатації з ладу виходить до 50 % двигунів, що встановлені на рухомому складі.

Ключові слова: електродвигун, електропоїзд, компресор, етапи пуску, теплові реле, перенавантаження, коротке замикання.

Постановка проблеми

При експлуатації рухомого складу існують такі режими роботи електродвигуна компресора, при яких по колу якоря протягом всього робочого циклу протікають такі струми, що не викликають спрацювання теплового реле ТРВ-8,5, але при цьому нагрівають ізоляцію обмоток якоря та полюсів до небезпечних температур, що підтверджується статистикою виходу з ладу вказаних двигунів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням надійності рухомого складу присвячені роботи таких вчених як Тихменев Б. М., Трахтман Л. М., Ісаєв І. П. та ін.

Метою цієї статті є розробка рекомендацій щодо підвищення надійності електродвигунів компресорів електропоїздів постійного струму та впровадження в експлуатацію нового пристрою захисту електродвигуна компресора від перенавантажень на базі сучасного мікроконтролера.

Виклад основного матеріалу

Тиск в гальмівній магістралі, температура навколишнього середовища та, в першу чергу, технічний стан самого компресора певним чином впливають на значення початкового моменту опору $M_{\text{оп.поч}}$, що в свою чергу впливає на значення струму, який протікає по колу якоря електродвигуна (ЕД) як під час його пуску, так і подальшої роботи.

Пуск електродвигуна в роботі розглядається таким, що складається з двох етапів [1, 2]. Перший етап – час від моменту подачі напруги на електродвигун до моменту рухання його валу. Другий етап – тривалість часу, за який кутова швидкість валу електродвигуна збільшується від нуля до сталого значення.

В реальних умовах експлуатації можливі випадки роботи електродвигунів компресорів протягом часу t_k (час, за який тиск у напірній магістралі підвищується з 0 атм до максимального значення 8,2 атм) зі

сталим значенням підвищеного моменту опору $M_{\text{оп.ст}}$, що може бути викликано цілим рядом причин. Під підвищеним значенням моменту опору будемо вважати такий момент, який після закінчення процесу пуску буде перевищувати значення номінального моменту електродвигуна компресора, тобто $M_{\text{оп.ст}} > M_{\text{ном}}$. Збільшення початкового моменту опору $M_{\text{оп.поч}}$, що призводить до збільшення тривалості першого етапу пуску, зумовлене збільшенням моменту опору механізму компресора по різних причинам.

Даний факт (підвищений момент опору) необхідно врахувати також при дослідженні процесу нагрівання ізоляції обмотки якоря.

Розглянемо можливий режим роботи електродвигуна компресора, коли пуск відбувається при порожній напірній магістралі, а подальша робота ЕД триває доти, доки тиск не підвищиться до 8,2 атм при умові, що після закінчення пуску момент опору на валу електродвигуна буде більше номінального.

Експериментально встановлено, що тривалість пуску та роботи ЕД компресора по підвищенню тиску з 0 до 8,2 атм, складає 395-405 с при напрузі у контактній мережі $U_m = 3000$ В та температурі навколишнього середовища $+20^\circ\text{C}$.

Як показали дослідження [3], кутова частота ω при напрузі в контактній мережі $U_m = 4000$ В збільшується на 21 % у порівнянні з $\omega_{\text{ном}}$. Таким чином час t_k при $U_m = 4000$ В буде на 21 % меншим від часу 405 с і складе 335 с. При $U_m = 2400$ В ω знижується на 20,8 % у порівнянні з $\omega_{\text{ном}}$. Відповідно, час, за який тиск у напірній магістралі при $U_m = 2400$ В підвищується з 0 до 8,2 атм, збільшується на 20,8 %

у порівнянні з випадком, коли $U_m = 3000$ В і складає 490 с.

За допомогою створеної автором математичної моделі [4, 5] та відповідної програми для ЕОМ, змодельовано пуск ЕД компресора при порожній напірній магістралі і його роботу протягом часу t_k при $U_m = 2400$ В, $U_m = 3000$ В та $U_m = 4000$ В.

Початковий момент опору під час пуску компресора з порожньою магістраллю згідно рис. 1 (крива б) складає $M_{оп.пoch} = M_{оп.ст} \cdot 0,34$. Приймаємо, що після закінчення пуску $M_{оп.ст} = M_{ном} = 58$ Нм, а відповідно $M_{оп.пoch} = 58 \cdot 0,34 = 19,7$ Нм.

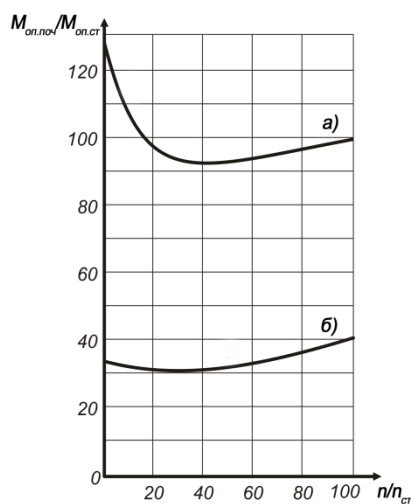


Рис. 1. Механічні характеристики поршневого компресора при пуску під навантаженням (протитиском) – а), та при пуску без навантаження – б)

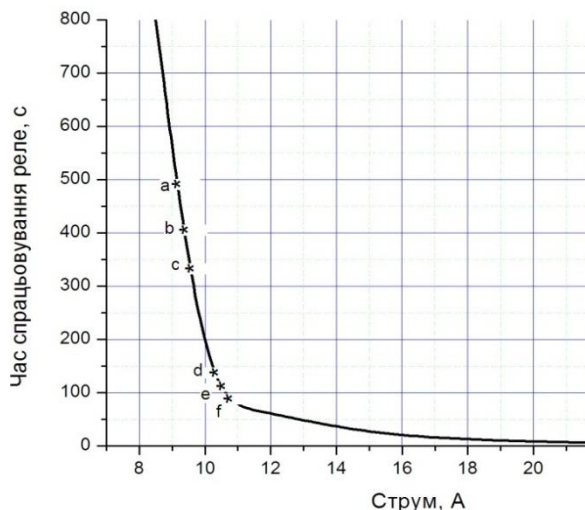
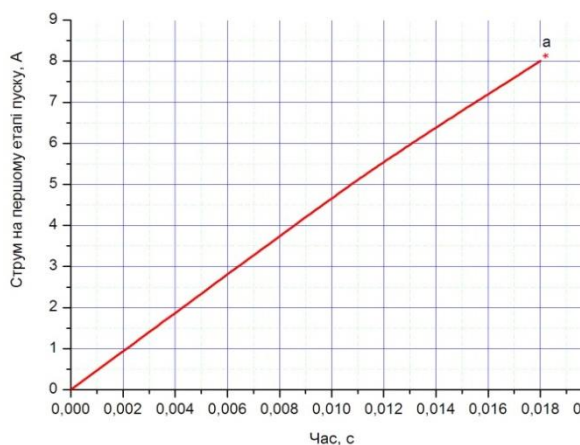
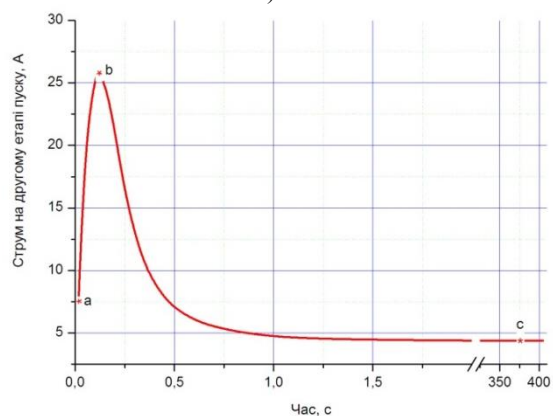


Рис. 2. Дослідна залежність $t = f(I)$ теплових реле ТРВ-8,5

Залежності струму $I_a(t)$ на першому та другому етапах пуску та кутової швидкості $\omega(t)$ отримані з допомогою ЕОМ для $U_m = 3000$ В та приведені на рис. 3 а), б) та рис. 4 відповідно.



а)



б)

Рис. 3. $I_a(t)$ під час пуску при порожній магістралі і подальшій роботі протягом $t_k = 405$ с при $U_m = 3000$ В та $M_{оп.ст} = M_{ном}$ після закінчення пуску

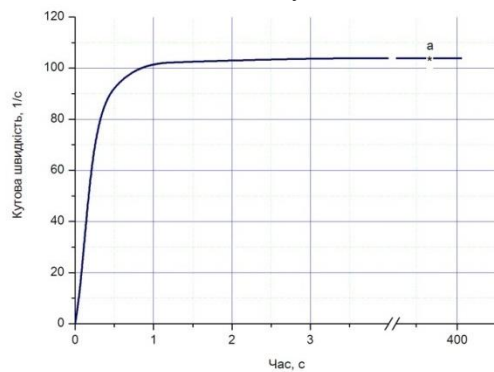


Рис. 4. $\omega(t)$ під час пуску при порожній магістралі і подальшій роботі протягом $t_k = 405$ с при $U_m = 3000$ В та $M_{оп.ст} = M_{ном}$ після закінчення пуску

Згідно з рис. 4 стає значення кутової швидкості вала ЕД компресора під час його роботи складає $103,9 \text{ с}^{-1}$. Визначимо на скільки відсотків в порівнянні з номінальним значенням ($\omega_{ном} = 106,8 \text{ с}^{-1}$) знизилась кутова швидкість ЕД компресора:

$$\frac{106,8-103,9}{106,8} \cdot 100 \% = 2,7 \%. \text{ Тобто } t_k \text{ в порівнянні}$$

з 405 с збільшився на 2,7 % і складає 415 с. Аналогічно визначається час t_k для всіх інших випадків, коли ω буде відрізнятися від $\omega_{\text{ном}}$.

Аналогічно проведено дослідження пуску і роботи ЕД компресора протягом часу t_k при $U_m = 2400$ В

та $U_m = 4000$ В відповідно. Отримані результати занесемо до табл. 1.

За допомогою залежності рис. 2 визначимо значення струмів, при протіканні яких протягом часу t_k відбудеться спрацювання теплового реле ТРВ-8,5. Результати занесемо до табл. 1.

Таблиця 1

Результати дослідження роботи електродвигуна компресора в першому режимі

Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	21	18	14
Діюче значення струму на протязі t_k , А	3,48	4,39	6,55
$M_{\text{оп.поч}}$, Нм	19,7	19,7	19,7
$M_{\text{оп.ст}}$, Нм	58	58	58
Стале значення ω , с^{-1}	88,7	103,9	130,6
t_k , с	474	415	332
Струм спрацювання теплового реле через час t_k , А	9,18 – точка «а» на рис. 2	9,3 – точка «b» на рис. 2	9,5 – точка «с» на рис. 2

Проведено дослідження впливу тривалості першого етапу пуску на еквівалентний струм, що протікає по колу якоря як під час пуску, так і подальшої його роботи. При дослідженні приймаємо збільшення тривалості першого етапу пуску на 10, 20, та 30 % у порівнянні з відповідними даними з табл. 1. Як показує практика, наведені збільшення тривалості першого етапу пуску, відповідають реальним умовам експлуатації рухомого складу.

Збільшення тривалості першого етапу пуску викликане збільшенням початкового моменту опору $M_{\text{оп.поч}}$, який в свою чергу може залежати від

$M_{\text{оп.ст}}$. Встановити залежність між $M_{\text{оп.ст}}$ та $M_{\text{оп.поч}}$ при пуску ЕД компресора з порожньою напірною магістраллю можливо завдяки залежності б), що приведена на рис. 1, згідно з якою $M_{\text{оп.поч}} = 0,34 M_{\text{оп.ст}}$.

При проведенні вказаних досліджень приймаємо, що співвідношення $M_{\text{оп.поч}} = 0,34 M_{\text{оп.ст}}$ буде справедливим для випадків, коли тривалість першого етапу пуску буде збільшуватись на 10, 20, 30 %. Результати досліджень представлено у вигляді табл. 2.

Таблиця 2

Результати дослідження роботи електродвигуна при збільшенні тривалості першого етапу пуску від 10 до 30 % у порівнянні з вихідними даними з табл. 1.

Тривалість першого етапу пуску збільшено на 10 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	23,1	19,8	15,4
Діюче значення струму на протязі t_k , А	4,04	5,6	7,81
$M_{\text{оп.поч}}$, Нм	26	28	27
$M_{\text{оп.ст}}$, Нм	76	82	79
Стале значення ω , с^{-1}	84,4	98,4	124
t_k , с	495	436	349
Струм спрацювання теплового реле через час t_k , А	9,1	9,28	9,5
Тривалість першого етапу пуску збільшено на 20 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	25,2	21,6	16,8
Діюче значення струму на протязі t_k , А	4,41	6,36	8,61
$M_{\text{оп.поч}}$, Нм	32	36	32
$M_{\text{оп.ст}}$, Нм	94	106	94
Стале значення ω , с^{-1}	80	94	120

Продовж. табл. 2

t_k, c	506	453	361
Струм спрацьовування теплового реле через час t_k, A	9,09	9,24	9,47
Тривалість першого етапу пуску збільшено на 30 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	27,3	23,4	18,2
Діюче значення струму на протязі t_k, A	5,01	6,76	9,26
$M_{оп.пoc}, Нм$	39	40	37
$M_{оп.ст}, Нм$	115	118	109
Стале значення ω, c^{-1}	77,5	92	116
t_k, c	514	461	375
Струм спрацьовування теплового реле через час t_k, A	9,08	9,17	9,4

Таким чином, при збільшенні тривалості першого етапу пуску до 30 % при напрузі в контактній мережі $U_m = 2400$ В отримали збільшення еквівалентного струму від 3,48 А до 5,01 А, при $U_m = 3000$ В еквівалентний струм збільшився від 4,39 А до 6,76 А, а при $U_m = 4000$ В еквівалентний струм збільшився від 6,55 А до 9,26 А.

При зміні тривалості першого етапу пуску змінюється також значення усталеної кутової швидкості, що в свою чергу призводить до зміни продуктивності компресора, тобто змінюється час роботи компресора t_k і відповідно змінюється час впливу еквівалентного струму на ізоляцію обмотки якоря.

За допомогою залежності з рис. 2 визначимо значення струмів, при протіканні яких протягом часу t_k відбудеться спрацьовування теплового реле ТРВ-8,5 [6]. Результати занесені до табл. 2.

Для зручності проведення аналізу отриманих результатів на базі табл. 1 та 2 побудуємо залежності еквівалентного струму за час t_k від напруги U_m при різних значеннях тривалості першого етапу пуску і представимо на рис. 5.

Визначимо за даними табл. 1 та 2 для кожного значення U_m величину мінімального еквівалентного струму $I_{екв.спр}$, при протіканні якого через теплове реле ТРВ-8,5 відбудеться його спрацьовування через час t_k . Так для $U_m = 2400$ В $I_{екв.спр} = 9,08$ А, для $U_m = 3000$ В $I_{екв.спр} = 9,17$, а для $U_m = 4000$ В $I_{екв.спр} = 9,4$ А. За вказаними трьома точками в одній системі координат побудуємо залежність $I_{екв.спр}$ від напруги U_m (рис. 5).

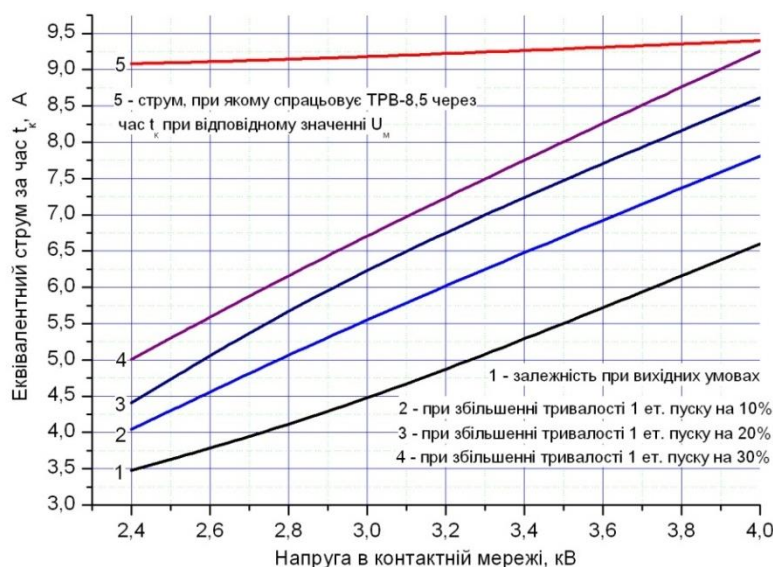


Рис. 5. Залежності $I_{екв}$ за час t_k від напруги U_m при різних значеннях тривалості першого етапу пуску при роботі ЕД компресора у першому режимі

Як видно з рис. 5, при збільшенні тривалості першого етапу пуску від 10 до 30 %, внаслідок збільшення по тим чи іншим причинам початкового моменту опору $M_{\text{оп.поч}}$ та моменту опору $M_{\text{оп.ст}}$, що діє на ЕД після закінчення пуску, по колу якоря протікають такі струми, що не викликають спрацьовування теплового реле ТРВ-8,5. Тобто, ЕД компресора буде відключений від живлячої мережі через час t_k не за допомогою теплового реле, а за допомогою реле тиску, але ізоляція електродвигуна може бути перегріта.

З допомогою теплової моделі [7] та відповідної програми для ЕОМ для еквівалентних струмів з врахуванням визначеного діапазону для кожного значення U_m ($3,48 \text{ А} < I_{\text{екв}} < 9,08 \text{ А}$ – при $U_m = 2400 \text{ В}$, $4,39 \text{ А} < I_{\text{екв}} < 9,17 \text{ А}$ – при $U_m = 3000 \text{ В}$ та $6,55 \text{ А} < I_{\text{екв}} < 9,4 \text{ А}$ – при $U_m = 4000 \text{ В}$) визначено перевищення температури ізоляції обмотки якоря τ_t (при певних значеннях тривалості першого етапу пуску) за відповідний час t_k . Отримані результати досліджень зведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати досліджень нагрівання ізоляції обмотки якоря при збільшенні тривалості першого етапу пуску від 10 до 30% у порівнянні з вихідними умовами

Тривалість першого етапу пуску збільшено на 10 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	23,1	19,8	15,4
Діюче значення $I_{\text{екв}}$ за час t_k , А	4,04	5,6	7,81
$M_{\text{оп.поч}}$, Нм	26	28	27
$M_{\text{оп.ст}}$, Нм	76	82	79
t_k , с	490	436	349
Значення τ_t , °С за час t_k	48	89	173
Тривалість першого етапу пуску збільшено на 20 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	25,2	21,6	16,8
Діюче значення $I_{\text{екв}}$ за час t_k , А	4,41	6,36	8,61
$M_{\text{оп.поч}}$, Нм	32	36	32
$M_{\text{оп.ст}}$, Нм	94	106	94
t_k , с	506	453	361
Значення τ_t , °С за час t_k	58	117	196
Тривалість першого етапу пуску збільшено на 30 % у порівнянні з відповідним значенням з табл. 1			
Напруга в контактній мережі, кВ	2,4	3,0	4,0
Тривалість першого етапу пуску, мс	27,3	23,4	18,2
Діюче значення $I_{\text{екв}}$ за час t_k , А	5,01	6,76	9,26
$M_{\text{оп.поч}}$, Нм	39	40	37
$M_{\text{оп.ст}}$, Нм	115	118	109
t_k , с	514	461	375
Значення τ_t , °С за час t_k	75	133	230

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що під час роботи ЕД компресора при вихідних умовах (без збільшення тривалості першого етапу пуску) з $U_m = 2400 \text{ В}$ та $U_m = 3000 \text{ В}$ ізоляція обмотки якоря не нагрівається до небезпечних значень температури. Допустимий перегрів для ізоляції класу В обмотки якоря електродвигуна ДК-409 складає 120°С . Але вже при збільшенні тривалості першого етапу пуску на 10 % при $U_m = 4000 \text{ В}$ можемо спостерігати вкрай небезпечний перегрів ізоляції обмотки якоря $\tau_t = 173^\circ\text{С}$.

Збільшення тривалості першого етапу пуску на 20 % при $U_m = 2400 \text{ В}$ не призводить до небезпечного нагрівання ізоляції. А при $U_m = 3000 \text{ В}$ значення перегріву ізоляції наближається до максимально допустимого значення і складає 117°С . Збільшення тривалості першого етапу пуску на 30 % при $U_m = 2400 \text{ В}$ також не призводить до небезпечного нагрівання ізоляції. А вже при $U_m = 3000 \text{ В}$ перегрів ізоляції складає $\tau_t = 133^\circ\text{С}$, що на 13°С більше максимально допустимого значення.

Висновок

Проведені дослідження показали, що в реальних умовах експлуатації рухомого складу існують такі режими роботи, при яких по колу якоря протягом всього робочого циклу протікають такі струми, що не викликають спрацювання теплового реле ТРВ-8,5, але при цьому нагрівають ізоляцію до небезпечних температур, що підтверджується статистикою виходу з ладу електродвигунів компресорів (до 50 % електродвигунів, що знаходяться в експлуатації). Тому для підвищення надійності рухомого складу гостро стоїть питання про заміну системи захисту електродвигуна компресора на більш досконалу, яка не буде мати вищевказаних недоліків, а також доцільна заміна ізоляції класу В [8] на більш високий клас.

Література

1. Гладырь, А. И. Трогание и пуск как фазы единого процесса [Текст] / А. И. Гладырь // Научн. труды КГПУ. Вып. 1 / 2001(10) – С. 24-29.
2. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода [Текст] / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
3. Краснов, Р. В. Підвищення надійності електродвигунів компресорів електропоїздів постійного струму: дис. кандидата техн. наук: 05.22.09 [Текст] / Р. В. Краснов. – Дніпропетровськ: 2012. – 220 с.
4. Жиц, М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока [Текст] / М. З. Жиц. – М.: Энергия, 1974. – 112 с.

5. Моделирование процесса пуска электропривода поршневого компрессора (ЕК-7Б) с двигуном ДК-406 (ДК-409) электропоезда ЕР-2 с учетом вихровых токов [Текст] / Р. В. Краснов та ін. // Збірник статей Харківської національної академії міського господарства. – 2011. – Вип. 97. – С. 251-256.

6. Цукало, П. В. Электропоезда ЭР2 и ЭР2Р [Текст] / П. В. Цукало, Н. Г. Ерошкин. – М.: «Транспорт», 1986. – 359 с.

7. Краснов, Р. В. Дослідження перегріву електродвигуна (ДК-409) компресора (ЭК-7Б) електропоезду постійного струму (ЭР-1, ЭР-2) за допомогою теплової схеми заміщення [Текст] / Р. В. Краснов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту №36. – 2011. – С. 79-83.

8. Правила ремонту электрических машин электровозов и электропоездов. ЦТ – 0063: Затв. і введено в дію наказом Міністерства транспорту України від 27.02.2003 р. № 53Ц [Текст] / Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2003. – 281 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л. В. Дубинець, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ.

Автор: КРАСНОВ Роман Володимирович
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, кандидат технічних наук, б/з.
E-mail – krasnov_rv@i.ua.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПУСКА И РАБОТЫ В НЕНОМИНАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КОМПРЕССОРОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Р. В. Краснов

В статье рассмотрены возможные режимы работы электродвигателя компрессора электропоезда постоянного тока, при которых происходит нагревание изоляции обмоток якоря сверх установленных значений. При этом тепловое реле ТРВ-8, 5 не выполняет свои функции и, как следствие, за один год эксплуатации из строя выходит до 50 % двигателей, установленных на подвижном составе.

Ключевые слова: электродвигатель, электропоезд, компрессор, этапы пуска, тепловые реле, перегрузки, короткое замыкание.

STUDY OF STARTING AND OF OPERATION IN REGIMES WHICH DIFFER FROM THE NOMINALS, OF ELECTRIC MOTORS OF COMPRESSORS ELECTRIC TRAINS DC

R. V. Krasnov

The article considers the possible modes of operation of the electric compressor of electric trains DC when there is a heating winding insulation anchors in excess of established values. In this case, the thermal relay TRV-8,5 does not perform its functions and, consequently, for one year of operation goes down to 50 % of the engines installed on rolling stock. To improve the reliability of electric rolling stock must be replaced compressor motor protection system for the better, which does not have the above disadvantages and need to replace the insulation class B to a higher class.

Keywords: electric motor, electric train, compressor, start-up phases, thermal relay, overload, short-circuiting.